
forum de simulações aéreas - fsa



**peso e balanceamento
de aeronaves de pequeno porte**

Eng.o José Francisco Lôbo

Junho/1999

Agradecimentos

Ao Cmte Adriano Carvalho, pelo seu trabalho competente, abnegado e silencioso no comando desta viagem através das melhores contribuições ao Vôo Simulado no Brasil, em forma de Aeronaves, Painéis, Utilitários, Textos, etc., sem que nada nos seja pedido em troca. Com certeza, essa dedicação exemplar tem servido de incentivo a uma gradual melhoria da qualidade de todos os trabalhos deste fórum.

Sinto-me honrado em participar deste grupo, como usuário e como colaborador, colocando-me sempre aberto a críticas pelo e-mail:

Jflobo@yahoo.com

Relação de Trabalhos do Autor Disponíveis em: <http://www.fsa.com.br>

- Física Aplicada ao Vôo Simulado
- Como Pegar Ondas ... de Rádio
- Deriva (Planilha Excel para Cálculo de Ângulo de Deriva)

"There are more things in heaven and earth,
Horatio, than are dreamt of in your philosophy"

SHAKESPEARE, William (1564 - 1616), Hamlet, 1592, Ato 1, cena 5.

Sumário

INTRODUÇÃO.....	4
1. ELEMENTOS DE FÍSICA.....	6
1.1 MASSA E FORÇA	6
1.2 EQUILÍBRIO DE UMA PARTÍCULA	6
1.3 MOMENTO ESCALAR DE UMA FORÇA.....	7
1.4 EQUILÍBRIO DE UM CORPO RÍGIDO	7
1.5 CENTRO DE MASSA.....	7
1.6 CENTRO DE GRAVIDADE DE CORPOS HOMOGÊNEOS.....	8
1.7 TIPOS DE EQUILÍBRIOS	8
2. CONDIÇÕES DE EQUILÍBRIO DO VÔO.....	10
2.1 PESO E BALANCEAMENTO.....	10
2.2 MOMENTOS DAS CARGAS	11
2.3 VÔO NIVELADO E RETILÍNEO.....	12
2.4 LOCALIZAÇÃO DO C. G VERSUS EQUILÍBRIO DO VÔO	14
2.5 LOCALIZAÇÃO IDEAL DO C.G	14
2.6 CENTRO DE SUSTENTAÇÃO	15
3. ENVELOPE DO CENTRO DE GRAVIDADE.....	17
3.1 CONSTRUÇÃO DO ENVELOPE DO C.G.....	17
3.2 CRIAÇÃO DE UM FORMULÁRIO ELETRÔNICO (PLANILHA EXCEL)	17
3.3 CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO DO ENVELOPE DO C.G.	18
3.4 EFEITO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL.....	18
4. MÉTODO PRÁTICO DE CÁLCULO.....	19
4.1 MOONEY M20J.....	19
4.2 QUADRO DE VALORES	19
5. ANEXOS.....	22
5.1 ANEXO I – PESO E LOCALIZAÇÃO	22
5.2 ANEXO II – GRÁFICO DE PESO E BALANCEAMENTO.....	23
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	24
7. GLOSSÁRIO.....	25
8. ÍNDICE REMISSIVO	26

Introdução

A versão atual do Flight Simulator 98 permite a modificação de peso dos modelos de aeronaves, através do reabastecimento de combustível, conferindo-lhes uma realidade ainda distante do verdadeiro carregamento que podem sujeitar-se as aeronaves reais. É nossa crença, no entanto, que não tardará muito para termos em nossos computadores mais realidade na simulação completa deste parâmetro, considerado essencial para quem deseja realizar um treinamento mais rigoroso, visando a profissionalização nos diversos segmentos da aviação. Enquanto esse dia não chega, convém estarmos preparados para os novos desafios e, ao mesmo tempo, cientes das restrições do modelo utilizado em nossas simulações.

Não sendo um programa voltado para a formação profissional, o FS98 precisa agradar tanto os que conhecem os meandros do voo quanto os que só desejam um pouco de diversão. Entretanto, à medida que nos enveredamos pelos seus caminhos, descobrimos mais e criamos mais gosto pela realidade: queremos simular outras condições, como variação do número de passageiros e do peso de suas bagagens, um reabastecimento de combustível feito com mais rigor, o transporte de cargas, este último de grande utilidade para as empresas virtuais que passariam a computar esses dados em suas estatísticas, além de suas horas de voo.

Certamente seria preciso fazer alguns cálculos a mais na programação de cada voo, pois o combustível transportado em excesso, ou seja, além daquele necessário para voar até o destino, sobrevoar durante uma hora e voar para a alternativa, no caso da impossibilidade de pouso no aeródromo de destino, seria um combustível transportado desnecessariamente ou uma carga morta. Por outro lado, o próprio consumo de combustível por tempo de voo seria função do desempenho da aeronave e da quantidade de carga transportada, tudo como é feito na vida real¹. Surgindo a dificuldade, seriam criadas as ferramentas para facilitar os cálculos.

Neste trabalho analisamos o carregamento e balanceamento de aeronaves de pequeno porte, cujos modelos são utilizados no FS98. A princípio, estas simulações não poderão ser feitas por completo, exceto quanto ao reabastecimento, mas esperamos poder contar, talvez já nas próximas versões do FS, com opções para implementação destas técnicas. Algumas das informações utilizadas neste trabalho provêm de programas profissionais de preparação de planos de voo que exigem parâmetros de configuração operacional mais completos e mais complexos da aeronave, obtidos a partir dos manuais de operação do fabricante. Um dos programas que utilizamos é o FliteStar, da Mentor-Jepesen, bastante conhecido na aviação simulada e real, por pilotos de aeronaves de pequeno e de médio porte.

Algum embasamento teórico de Física é apresentado, a título de revisão, sendo sua leitura dispensada aos que têm conhecimentos teóricos da matéria. Trata-se,

¹ Todos os conceitos, cálculos e resultados deste trabalho aplicam-se unicamente a modelos de aeronaves utilizadas no simulador de voo FS98, mesmo quando feitas referências a aeronaves reais.

Nenhuma dedução, aplicação ou extensão dos conceitos aqui expostos pode ou deve ser feita a aeronaves e vôos reais, cujas especificações constam em seus manuais de operação, de permanência obrigatória a bordo das aeronaves e que constituem a fonte oficial de referência e consulta do piloto.

principalmente, de Forças, Momentos e Condições de Equilíbrio. Os que considerarem esta abordagem insuficiente podem recorrer a livros-textos de Física, a nível de segundo grau.

Por fim, é importante observar que nosso voo simulado não é profissional. Portanto, todas as definições, deduções, conclusões deste trabalho aplicam-se, tão somente, à simulação de voo em programas de uso doméstico. Apesar de nos fornecer uma razoável indicação do que é a ciência aeronáutica, a profissionalização, em todos os níveis, requer outros cuidados e normas a serem seguidos, especificamente para esse fim, nos cursos de formação apropriados.

1. Elementos de Física

1.1 Massa e Força

A idéia de força é intuitiva. Exercendo um esforço para puxar ou empurrar um objeto, estamos lhe comunicando uma força. Uma locomotiva exerce uma força para arrastar os vagões. Sentimos os pesos dos objetos como forças que os puxam para baixo, contrariamente aos nossos esforços de suspendê-los. A força é uma grandeza vetorial cuja definição inclui sua intensidade, direção e sentido.

As forças surgem sempre aos pares, como um efeito de ação e reação seja por um contato físico, quando tentamos suspender um objeto, seja por uma atração feita à distância entre os corpos, simplesmente pela presença de um em relação ao outro ou por ações de naturezas elétrica ou eletromagnética, como é o caso da Lua, presa ao nosso planeta por uma força que lhe mantém em órbita ou como a atração que o Sol exerce sobre todos os corpos do seu sistema, sem nenhum vínculo material.

A força peso tem direção e sentido voltados para o centro da Terra. Esta direção é denominada de vertical e o sentido de orientação da força peso é de cima para baixo. O conceito de peso é intuitivo, não há dúvida. Entretanto, Isaac Newton (1642-1727) teve a necessidade de definir, preliminarmente, outra grandeza: a massa definindo-a como uma propriedade fundamental da matéria, descrita por fenômenos de seus comportamentos inercial e gravitacional.

A massa é a propriedade que faz a matéria resistir a uma mudança no seu estado de movimento, conhecida como inércia. Portanto, é uma propriedade intrínseca de um corpo material e não depende de sua localização, enquanto o peso é uma força exercida sobre uma massa e é determinado pela posição do corpo em um campo gravitacional. A massa de uma nave espacial não muda pelo fato de ela estar na Terra ou pousada na Lua, embora a atração (aceleração da gravidade) exercida naquele satélite lhe seja menor.

A unidade de massa (M) é uma das três unidades fundamentais na definição de um sistema de medidas MLT: (M – Massa, L – Comprimento e T – Tempo). No Sistema Internacional – SI é denominada quilograma (kg) com seus múltiplos e submúltiplos, tonelada (1.000 kg) e o grama ($0,001\text{ kg}$), respectivamente. No Sistema Inglês adota-se a libra-massa ou simplesmente libra (lb), sendo 1 lb igual a $0,453592\text{ kg}$ ou 1 kg igual a $2,204623\text{ lb}$.

A unidade de força (ou peso) é o quilograma-força (kgf), no SI e libra-força (lb) no Sistema Inglês, guardando as mesmas relações numéricas de transformação da massa.

1.2 Equilíbrio de uma Partícula

Partícula ou ponto material é um corpo de dimensões desprezíveis, que podem ser ignoradas. Para alterar a inércia de uma partícula há necessidade de uma força. Entende-se como inércia tanto o movimento retilíneo e uniforme como o repouso dessa partícula. Em resumo, para que uma partícula esteja em equilíbrio é necessário

que a soma de todas as forças agindo sobre ela seja nula. Considera-se partícula um objeto de dimensões bastante pequenas, de forma que possa ser representado por um ponto.

1.3 Momento Escalar de uma Força

Tomemos um corpo rígido e que tenha liberdade para girar em torno de um eixo qualquer. Por exemplo, uma porta que pode girar em torno de suas dobradiças de fixação ou uma superfície de comando primária de uma aeronave, como o leme vertical que pode girar para a esquerda ou para a direita. Percebemos que para girar a porta precisamos fazer uma força e quanto mais distante do eixo de giro menor será essa força (F). Isto é, a porta gira não sobe o efeito puro e simples da força, mas por uma composição da força com seu ponto de aplicação Chamaremos de braço (b) da força F a distância entre seu ponto de aplicação e o eixo de giro.

Chamamos de Torque ou Momento Escalar o produto da intensidade da força F pelo seu braço b, podendo ter o sinal positivo ou negativo, dependendo da convenção:

$$M = F \cdot b$$

1.4 Equilíbrio de um Corpo Rígido

Corpo rígido ou sólido é considerado aquele em que as distâncias entre suas partículas permanecem inalteradas, isto é, um corpo indeformável ideal. Por ter dimensões consideráveis, em dois ou mais eixos ou sentidos, esses corpos podem sofrer, além do movimento de translação do seu centro de massa também os movimentos de rotação em relação aos seus diversos eixos. As condições de equilíbrio devem incluir esses movimentos.

Para que um corpo rígido esteja em equilíbrio são necessárias duas condições:

- que o seu centro de massa esteja em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme;
- que a soma algébrica dos momentos escalares de todas as forças em relação a qualquer eixo perpendicular ao plano seja nula.

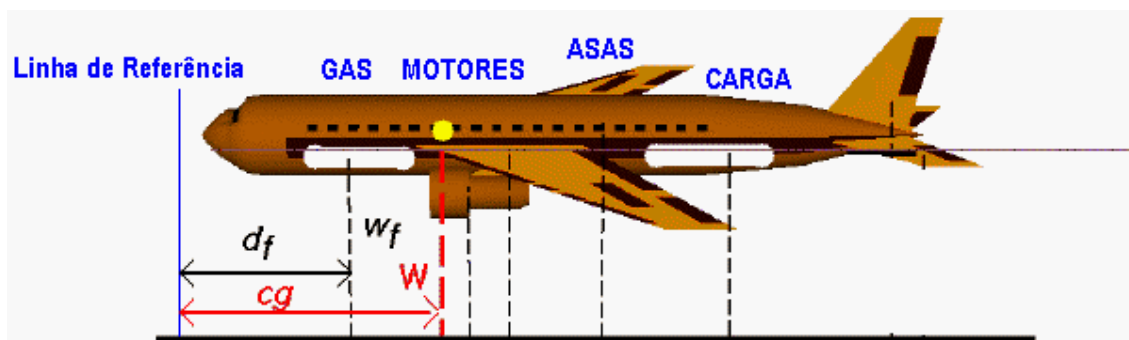
1.5 Centro de Massa

Centro de massa, abreviadamente C.M., de um corpo rígido ou de um sistema de pontos materiais discretos e coplanares é um determinado ponto por onde passa a linha de ação do peso deste corpo ou da força peso resultante de todos os pontos materiais que compõem o sistema. A mesma noção aplica-se a centro de gravidade

Para calcularmos a posição do centro de massa (C.M.) de um conjunto de pontos materiais, procedemos da seguinte forma:

- 1) tomamos um eixo de rotação imaginário como referência;
- 2) calculamos o produto da massa de cada carga pela distância a esse eixo;
- 3) somamos todos os produtos calculados conforme anterior;

- 4) dividimos a soma dos produtos pela soma de todas as massas.



• Fig. 1.1 Cargas e braços de Cargas

Fonte: Nasa – Glenn Research Center – Determining Center of Gravity

Disponível em:

<http://www.lerc.nasa.gov/WWW/k-12/BGA/BGAindex.html>

1.6 Centro de gravidade de corpos homogêneos

Considerando um corpo de dimensões pequenas (em relação a outro) e feito de material uniforme, por exemplo, uma placa de aço. Seu baricentro ou centro de gravidade (C.G.) corresponde ao centro geométrico, localizado no cruzamento de suas diagonais. O C.G. de um disco está localizado no centro do mesmo.

Podemos estender estas observações para alguns corpos sólidos simétricos, como uma esfera, um cubo, um cilindro cujos centros de gravidade localizam-se nos centros geométricos, por onde passam os eixos de simetria desses corpos rígidos maciços.

O C.G. da fig. 1.1, representando uma aeronave é obtido somando todos os produtos dos pesos das partes da aeronave multiplicados por suas distâncias a um plano localizado à frente da aeronave e dividindo o resultado pela soma de todos os pesos. O valor encontrado é uma distância representada pelo segmento cg da figura 1.1, que representa a localização da linha de ação da força peso. Caso houvesse necessidade de suspender essa aeronave por um único fio, este deveria passar obrigatoriamente pelo seu centro de gravidade ou centro de massa.

1.7 Tipos de Equilíbrios

Os corpos submetidos ao campo gravitacional da Terra são atraídos por uma força ligando o centro de massa do corpo ao centro da Terra, que chamamos peso. Por conta dessa atração, os centros de massa dos corpos tendem a ocupar o lugar mais baixo possível, adquirindo uma posição de equilíbrio.

Equilíbrio indiferente - Os corpos simétricos e homogêneos têm seus centros de massa localizados no cruzamento dos seus eixos de simetria. Um corpo dessa forma, colocado sobre uma superfície plana, pode ocupar qualquer posição sem que o seu centro de massa se modifique em relação à Terra, ou seja ele está numa posição de equilíbrio indiferente. Por exemplo, uma esfera, um cilindro ou um cone (apoiados sobre a aresta) rolam de um lado para outro, indiferentemente.

Equilíbrio instável - Se conseguirmos colocar um cone apoiado no seu vértice sobre uma superfície plana, ao menor toque esse sólido tombará, procurando acomodar o seu centro de massa numa posição mais baixa possível.

Equilíbrio estável - Apoiando o cone do nosso exemplo sobre sua base circular, observamos que uma tentativa de girar esse corpo cria uma força que tende a restaurar a posição anteriormente assumida. Quanto maior a força restauradora, mais estável será o equilíbrio desse corpo. Por exemplo, um cone de base mais larga do que outro, sendo ambos de mesma altura, terá uma posição de equilíbrio mais estável.

Os mesmos exemplos de equilíbrio acima poderiam ser dados utilizando-se uma garrafa. Neste caso, a garrafa “deitada” teria um equilíbrio indiferente, podendo rolar para qualquer lado, colocada “em pé” teria um equilíbrio estável e colocada com a boca para baixo assumiria uma posição de equilíbrio instável, podendo tombar facilmente.

2. Condições de Equilíbrio do Vôo

2.1 Peso e Balanceamento

“A fim de obter boas características de vôo, segurança e desempenho proporcionadas pelo EMB-711 ST - CORISCO II, o vôo deve ser realizado com o peso e o centro de gravidade (C.G.), dentro do limite operacional aprovado. A aeronave oferece enorme flexibilidade de carga; não pode, no entanto, voar com o número máximo de passageiros adultos, tanques de combustível totalmente cheios e bagagem máxima [...] Antes da decolagem, o piloto deve certificar-se de que o avião está carregado de acordo com o envelope de carregamento”. (Manual de Operações EMB-711 ST – CORISCO II. EMBRAER, 1980. p. 6.1

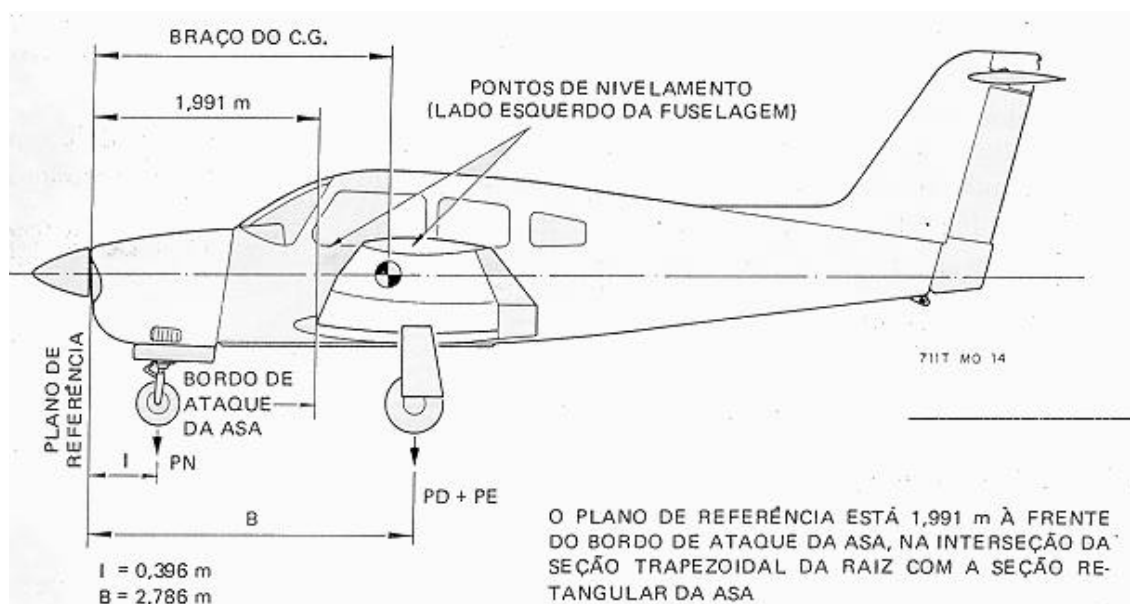


Fig. 2.1 Diagrama de Nivelamento do Avião

Fonte: Manual de Operações EMB-711 ST – CORISCO II EMBRAER, 1980. p. 6.3

O limite operacional da aeronave determina o limite máximo de peso bem e a localização das cargas que podem ser transportadas: pilotos e passageiros suas bagagens, combustíveis e lubrificantes, equipamentos opcionais da aeronave, entre outros. Antes de entregar a aeronave, o fabricante procede à sua pesagem. “O peso vazio básico consiste do peso vazio padrão do avião, o óleo de motor, óleo hidráulico, o combustível não utilizável², mais o equipamento opcional”, diz o Manual de

² Combustível não utilizável é aquele que fica no fundo do tanque, onde se acumula a condensação de vapor d’água, e que não pode ser aspirado pela bomba de combustível. Corresponde a 2,50 US GAL em cada tanque do CORISCO II (N.A).

Operações. O peso vazio básico determina a localização do centro de gravidade (C.G.) da aeronave vazia.

Destacamos na Fig. 2.1 Diagrama de Nivelamento do Avião, os seguintes elementos:

- plano de referência, localizado à frente da aeronave e a partir do qual as distâncias ou braços das forças são medidos;
- PN - indicação da pesagem, na roda dianteira;
- PD - indicação da pesagem, na roda direita;
- PE - indicação da pesagem, na roda esquerda;
- I - braço (fixo) do peso PN, gerando o momento $M1 = PN \times I$;
- B - braço (fixo) dos pesos PD + PE, gerando o momento $M2 = (PD + PE) \times B$;
- braço do centro de gravidade (variável), ou seja, o ponto de localização do C.G, medido a partir do plano de referência, é calculado assim:

O centro de gravidade será modificado pela adição de cargas ao avião. Quando forem instalados equipamentos definitivos, estes deverão constar das anotações do manual da aeronave, com a respectiva modificação do C.G. referente ao peso vazio básico acima calculado. A partir destes dados, o piloto carrega a aeronave calculando os pesos e os momentos desse carregamento específico, verificando se o C.G. resultante está dentro do envelope aprovado.

A aeronave com excesso de peso não decola, não sobe nem voa tão bem quanto uma aeronave carregada dentro dos limites. Conforme expresso no Manual, não é possível levar tudo ao mesmo tempo. Se houver necessidade de transportar todos os passageiros e suas bagagens, o piloto deve diminuir a quantidade de combustível nos tanques, para a etapa de vôo prevista. Com isso, poderá haver necessidade de fazer um ou mais pousos técnicos para reabastecimentos, dependendo da distância entre a origem e o destino do vôo.

Normalmente, o peso máximo permitido para pouso é menor do que a capacidade de carga da aeronave. Em outras palavras, mesmo decolando com o peso dentro do limite máximo, a aeronave não pode regressar imediatamente para pousar, devendo consumir parte do combustível para não afetar sua estrutura. Em caso de emergência, o piloto deve estar treinado para realizar o procedimento previsto.

2.2 Momentos das Cargas

Balaceamento e peso andam juntos no carregamento da aeronave. Não importa apenas o limite máximo de peso. É preciso, também, que a localização das cargas obedeça as indicações do manual.

Os assentos, os bagageiros, os tanques de combustível e lubrificantes, todos, têm uma distância determinada, chamada braço da carga. Cada carga concorre com um determinado Momento (M), dado pelo produto do seu peso (kgf) pelo seu braço

(m). Vejamos no exemplo a seguir, para uma aeronave tipo EMB-800C – SENECA II, como isto é feito:

Peso e Balanceamento - EMB-800C - CORISCO II						
Descrição do Item	Braço (m)	Quantidade		Carregamento		
		Máx.	Real	Peso (kgf)		Momento
Peso Vazio Básico – FIXO	2,223		1.365	Unit.	Total	3.033,71
Ocupantes Dianteiros (Piloto+1 Pax)	2,170	2	2	77	154	334,18
Ocupantes Intermediários (2 Pax)	3,000	2	2	77	154	462,00
Ocupantes Traseiros (2 Pax)	4,000	2	2	77	154	616,00
Combustível Utilizável (litros)	2,380	350	350	0,72	252	599,76
Bagageiro Frente (kgf)	0,570	45	45	1	45	25,65
Bagageiro Atrás (kgf)	0,454	45	45	1	45	20,43

Tabela 2.1 - Peso e Balanceamento

Conforme observado na tabela 2.1 - Peso e Balanceamento os valores entrados na coluna “Real” foram os máximos permitidos para aquele tipo de carga. Considerando o peso vazio básico, que é um valor fixo fornecido pela pesagem do fabricante, neste caso de 1.365 kgf, e adicionando as demais cargas de ocupantes, combustível e bagagem, temos um total de 2.169 kgf. No caso desta aeronave, devemos observar os seguintes limites:

- 1) peso máximo de decolagem: 2.066 kgf;
- 2) peso máximo de pouso: 2.000 kgf.

Neste exemplo de carregamento o vôo torna-se impraticável, cabendo ao piloto adequar o carregamento às especificações da aeronave, retirando pesos até que os limites máximos de peso sejam atingidos. Reduzindo o combustível utilizável para 205 litros, o peso total seria de 2.065 kgf, portanto dentro dos limites. Naturalmente, o piloto poderia fazer outras opções, como diminuir as cargas nos bagageiros dianteiro e traseiro, e/ou reduzir a quantidade de passageiros se a carga tiver uma obrigatoriedade de ser transportada.

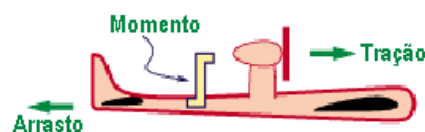
Verificamos apenas o fator carga mas não vimos sua consequência sobre o deslocamento do C.G.. Mesmo quando os limites de peso são obedecidos o centro de gravidade poderá cair fora do envelope. Verificaremos este fator mais adiante.

2.3 Vôo Nivelado e Retilíneo

Uma aeronave em vôo nivelado e retilíneo, desenvolvendo uma velocidade constante, do ponto de vista da Física está em equilíbrio, ou seja, a resultante de todas as forças agindo sobre a mesma é nula e também a soma de todos os momentos, em relação a qualquer um dos seus três eixos é obrigatoriamente nula.

As duas forças horizontais, tração e arrasto (resistência ao avanço da aeronave, causado pelo atrito com o ar) também colocam-se, propositadamente, desalinhadas, dependendo do projeto da aeronave, no sentido de ser possível criar uma diferença de momento no mesmo sentido do anterior. O eixo da força de tração do motor ou motores está mais acima do que o eixo da força resultante do arrasto. A aplicação de potência ao motor ocasiona uma tendência de baixar o nariz da aeronave, auxiliando no comando aplicado pelo profundor.

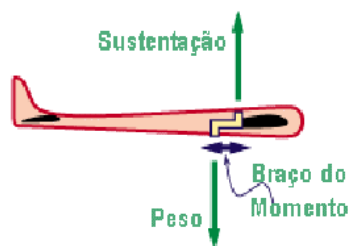
Geralmente observamos as quatro forças básicas que agem sobre o vôo, sem considerarmos os momentos que estas forças produzem. A linha de suporte da força de tração motora é paralela à linha suporte da força resultante dos arrastos, mas não coincidem.



• Figura 2.2 Binário Criado pelas Força Horizontais

Isto se dá pela necessidade de criar momentos necessários à dirigibilidade e à estabilidade do vôo. Se as duas forças verticais, peso e sustentação e as duas forças horizontais (tração e arrasto) estivessem diretamente alinhadas, duas a duas, o centro de massa da aeronave poderia girar sem controle.

O mesmo acontece com relação às forças verticais de peso (P) e sustentação (S), que têm seus suportes paralelos mas não coincidentes, criando também um



binário, com tendência a girar em sentido contrário ao anterior, dando o equilíbrio e a reserva de torque para aplicação dos comandos da aeronave. Imaginemos um plano (vertical) contendo os eixos longitudinal e vertical de uma aeronave.

• Figura 2.3 Binário Criado pelas Força Verticais

A força de sustentação tem o sentido para cima (em relação à Terra), enquanto a força peso, que se lhe opõe tem o sentido para baixo. Dependendo do projeto da aeronave, o eixo de aplicação da força peso normalmente está mais próximo do nariz da aeronave do que o eixo da força de sustentação. O resultado é uma tendência do nariz da aeronave girar (em relação a um eixo passando ao longo das asas e perpendicular ao plano vertical descrito). O giro pode se dar no sentido nariz para cima ou nariz para baixo, dependendo do desequilíbrio entre os momentos das duas forças verticais, peso e sustentação. Esse desequilíbrio é causado pela atuação do profundor (estabilizador horizontal), sob comando do piloto.

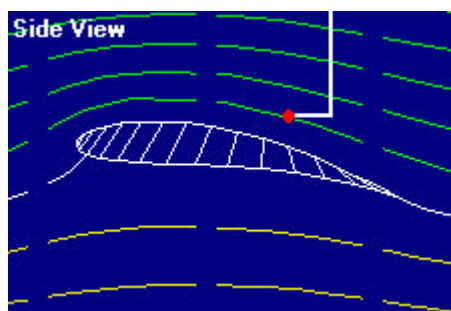
2.4 Localização do C. G Versus Equilíbrio do Voo

“A localização do C.G. influencia acentuadamente as características de voo. Um C.G. deslocado muito para a frente, em qualquer avião, dificulta a rotação nos pousos e decolagens. O nariz da aeronave tem dificuldade de subir, mesmo quando é feito um grande esforço sobre o profundor. Por outro lado, se o C.G. estiver muito para trás, a aeronave poderá rodar na decolagem, quando ainda não atingiu a velocidade mínima. Na subida, a aeronave tende a cabrar, podendo resultar em estóis inesperados ou até entrar em parafusos, cuja recuperação tornar-se-á mais difícil.”

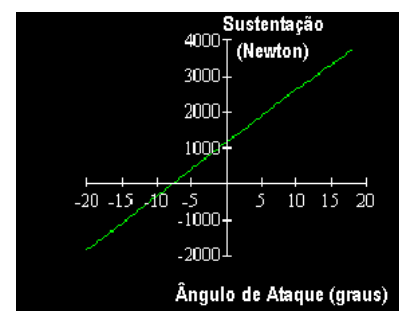
(Manual de Operações EMB-711 ST – CORISCO II EMBRAER, 1980. p. 6.1

2.5 Localização Ideal do C.G

A sustentação principal da aeronave é dada pela asa havendo uma pequena contribuição, positiva ou negativa, do profundor, resultando num centro de sustentação localizado muito próximo do centro de sustentação da asa. O C.G. deverá localizar-se próximo desse ponto, podendo variar ou pouco para a frente ou para trás.



• Fig. 2.4 ângulo de Ataque de 10 graus



• Fig. 2.5 Sustentação (VA = 120 km/h)

As figuras acima foram geradas com o software FoilSim, da NASA - Glenn Research Center. Disponível em:

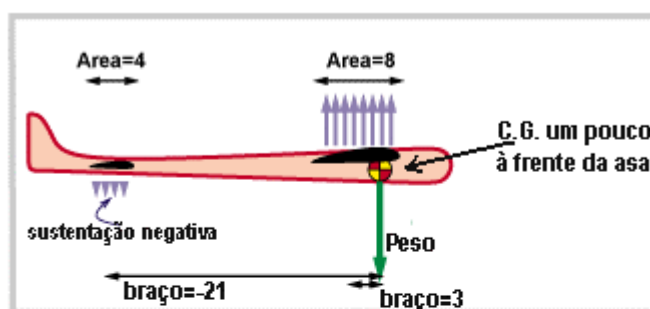
<http://www.lerc.nasa.gov/WWW/K-12/BGA/BGAindex.html>

2.6 Centro de Sustentação

A força de sustentação (S) é criada pelo movimento relativo da asa com o ar atmosférico. Essa força depende do ângulo de ataque³, superfície (área) da asa, da densidade do ar e do quadrado da velocidade relativa.

Pode-se observar a partir da fig. 2.4 que existe uma maior concentração de pressão no bordo de ataque da asa.. Normalmente, 50% de toda a força de sustentação está concentrada no primeiro quarto da asa (25% do início da CMA – Corda Média Aerodinâmica). Outras partes da aeronave produzem sustentação, inclusive o profundor, havendo uma força resultante, cujo ponto de aplicação denomina-se centro de sustentação. A fig. 2.5 mostra que essa força, para uma mesma velocidade, varia com o ângulo de ataque, ocasionando uma modificação do centro de sustentação.

Para pequenas variações e quando o centro de gravidade está localizado ligeiramente à frente do centro de sustentação é gerado um efeito de correção na atitude (pitch – positivo ou negativo) da aeronave. Neste caso, dizemos que o equilíbrio é estável.



O braço do momento do profundor (-21) tem o sentido negativo em relação à rotação dada pela sustentação da asa.

A contribuição do profundor é pequena porque o C.G. está só um pouco adiantado. Há reserva para cabrar ou picar.

• Fig. 2.6 C.G. localizado à frente do centro de sustentação

Se o C. G. estiver localizado à frente do centro de sustentação o piloto precisa estar atento para controlar a tendência de baixar o nariz que poderia resultar em excesso de velocidade. Durante a decolagem aeronave “roda” com mais dificuldade e no pouso o arredondamento na final e o “flare” também tornam-se mais complicados por causa do efeito solo que tende a criar uma sustentação positiva sobre o profundor, num momento em que o efeito desejado é exatamente o contrário.

³ Ângulo de ataque é aquele formado entre as direções do vento relativo e do movimento da asa, conforme a direção da Corda Média Aerodinâmica - CMA.

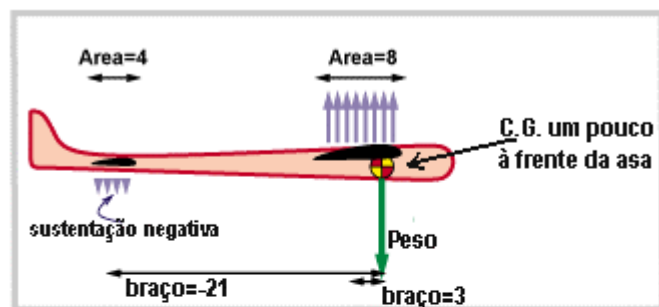


Neste exemplo o C.G. está muito atrás, requerendo mais sustentação positiva do profundor, que fica sem reserva para eventuais recuperações. Como ambas as sustentações são positivas, toma-se um dos braços com sinal negativo. A sustentação do profundor $\times (-12)$ iguala a sustentação da asa $\times 6$, no equilíbrio.

As conseqüências de um C.G. muito atrás são as seguintes: A estabilidade longitudinal fica reduzida pois o profundo fornece quase toda sua sustentação positiva para o vôo nivelado. A aeronave tem uma enorme tendência a cabrar, aumentando perigosamente o ângulo de ataque da asa, ao menor descuido. O resultado pode ser estóis perigosos ou parafusos de difícil recuperação. Ver a Fig. 2.7 ao lado, mostrando esta situação.

• Fig. 2.7 C.G. localizado atrás do centro de sustentação

O terceiro exemplo contempla um C.G. só um pouco atrás do centro de sustentação. Temos um equilíbrio estável. O estabilizador fornece uma positiva, ajudando a asa, e existe uma reserva de sustentação, positiva ou negativa, para as manobras de baixar ou subir o nariz, sem maiores dificuldades. Ilustramos esta condição na Fig. 2.8, a seguir.



O braço do momento do profundor (-21) tem o sentido negativo em relação à rotação dada pela sustentação da asa.

A contribuição do profundor é pequena porque o C.G. está só um pouco adiantado. Há reserva para cabrar ou picar.

• Fig. 2.8 C.G. pouco deslocado do centro de sustentação

As três figuras foram adaptadas de DENKER, John. Cap. 6 - Angle of Attack, Trim and Spiral Dives.

3. Envelope do Centro de Gravidade

3.1 Construção do Envelope do C.G.

Todas as informações para cálculo do peso e balanceamento são baseadas nas especificações do fabricante da aeronave, constantes no Manual de Operação. Seguiremos passo a passo um cálculo a título de exemplo, para uma aeronave modelo Seneca II, baseada na EMB-800C, da EMBRAER.

- passo 1 - o dado inicial é o peso vazio básico e a localização do respectivo C.G. para o avião descarregado, baseado na pesagem de fábrica, cujo cálculo foi demonstrado na Seção 2, deste documento: peso vazio 1.365 kgf, localizado a 2,223 m do plano de referência;
- passo 2 - anotar as limitações de peso
 - peso máximo de decolagem: 2.066 kgf;
 - peso máximo de aterragem: 2.000 kgf;
 - peso com zero combustível: 1.800 kgf;
- passo 3 - anotar as faixas de variação permitidas para o C.G., para determinados limites de peso. No exemplo temos duas faixas:
 - 1ª) 1.544 kgf, entre os limites desde: 2,083 m a 2,403 m; e
 - 2ª) 2.066 kgf, entre os limites desde: 2,301 m a 2,403 m;
- passo 4 - formatar uma tabela, contendo cada item a ser carregado, com os limites de peso e o braço do momento respectivo (vide a Tabela 2.1 - Peso e Balanceamento, deste documento, referente ao Seneca II);
- passo 5 - elaborar um gráfico, plotando no eixo vertical o peso e no eixo horizontal o braço do momento do C.G., conforme o modelo abaixo:

3.2 Criação de um Formulário Eletrônico (Planilha Excel)

Embora pareça que o C.G. caia sempre dentro do envelope, se obedecermos o carregamento nos limites especificados, é surpreendente que ele possa cair fora do envelope com relativa facilidade. Por esta razão, o piloto não deve confiar totalmente no seu “olho clínico”.

Quando o piloto voa uma determinada aeronave com frequência é aconselhável preparar uma planilha de cálculos tipo Excel, a fim de automatizar as operações e minimizar as possibilidades de erros de cálculos. Uma vez entrados os parâmetros de sua aeronave, para cada nova etapa do voo basta lançar os dados

referentes a: número de passageiros, quantidade de combustível e peso da bagagem e obter uma confirmação do peso total e da localização do C.G.

Mesmo voando com o peso e/ou o C.G. “quase fora” do envelope, se o piloto tiver ciência e consciência dessa situação poderá estar atento à diminuição da estabilidade longitudinal e sempre pronto para fazer as devidas correções.

3.3 Construção do Gráfico do Envelope do C.G.

Para traçar o gráfico do envelope do C.G. em uma planilha Excel, inicialmente são marcados os pontos fixos ou limites que não podem ser excedidos, relativos aos braços do C.G. e aos pesos, mínimos e máximos

O eixo horizontal é graduado em metro ou em polegada, dependendo do sistema de unidades, e nele é marcada as distâncias dos braços do C.G. que não podem ser excedidos, referenciados a um plano horizontal localizado à frente da aeronave.

O eixo vertical é graduado em quilograma-força ou em libra-força. Nele são marcados os pesos mínimos e máximos, para as limitações da aeronave. Na base do envelope é marcado o peso vazio básico e na parte superior do envelope fica o peso máximo de decolagem.

O formato do envelope, quase sempre, tem a aparência da figura apresentada no gráfico do Anexo II.

A planilha “Cálculo de CG” que preparamos para este trabalho poderá estar disponível apenas para os cálculos da aeronave modelo simulado Seneca II. As fórmulas e pontos do gráfico são desprotegidos para quem desejar modificá-los com especificações de outras aeronaves

3.4 Efeito do Consumo de Combustível

No nosso exemplo, reabastecemos com 350 litros de gasolina de densidade 0,72 kg/litro, perfazendo o peso de 252 kgf, cuja localização (braço do momento) está situado à distância de 2,380 m do plano de referência, quase no limite máximo do envelope, que é de 2,403 m, deslocado de apenas 2 centímetros.

A localização do tanque de combustível é feita de tal forma que o consumo ao longo do vôo altera muito pouco a localização do C.G., deslocando-o mais para a frente, o que é benéfico para a estabilidade longitudinal

O programa de computador (comercial) FliteStar, da Mentor-Jepesen, apresenta uma grande variedade de aeronaves pré-configuradas, facilitando sua aplicação imediata.

4. Método Prático de Cálculo

4.1 Mooney M20J

O FS2000 inclui uma nova aeronave: Mooney M20J. Sendo um modelo de voo novo e disponível apenas na versão PRO, espera-se que ele admita mais simulação da realidade, não apenas do voo propriamente dito mas também com relação aos parâmetros operacionais.



• Fig. 4.1 Mooney M20J

Existem vários modelos do Mooney M20J compatíveis com o FS98. Um deles está representado na figura abaixo. Utilizaremos os dados de peso e localização das cargas para uma aeronave real, disponíveis no programa FliteStar, da Mentor-Jepesen, para demonstrar como calcular e desenhar um envelope gráfico de C.G. específico para esse modelo de aeronave.

4.2 Quadro de Valores

No Quadro 4.1 (abaixo) temos os dados utilizados para calcular a localização do C.G. do Mooney M20J, para uma determinada condição que explicaremos a seguir:

- temos o peso vazio básico de 1.710 lbs, cuja localização dista 44,0 polegadas do plano de referência;
- a aeronave tem somente um bagageiro atrás, com capacidade para 120 lbs, livre neste carregamento; seu braço mede 95,5 polegadas;
- peso em libras do combustível utilizável é de 384 lbs, estando os tanques localizados a 48,4 polegadas;
- os assentos dianteiros distam 35,3 polegadas do plano de referência;
- os assentos traseiros distam 70,6 polegadas do plano de referência; o peso padrão para cada ocupante é de 170 libras, aproximadamente 77 kgf;
- a aeronave tem um pequeno compartimento com capacidade para 10 libras, localizado a 119,0 polegadas do plano de referência;
- peso total do carregamento excede o peso máximo de decolagem, embora o C.G. esteja dentro do envelope, a 47,1 polegadas.

O vôo não é aconselhável, pelo excesso de peso que poderá causar danos estruturais tanto no pouso como numa curva mais fechada (aceleração centrípeta ou “força G”). Cabe ao piloto reduzir o carregamento e recalculá-lo o peso máximo e o C.G.

Em anexo, apresentamos um formulário para entrada de dados de pesos e braços e os valores dos cálculos dos momentos respectivos.

Os quadros abaixo mostram outro exemplo para a mesma aeronave, agora com os pesos dados em kgf:

- 1) o bagageiro tem apenas 30 kgf;
- 2) colocamos 150 kgf de combustível, correspondente a 208 litros (densidade de 0,72 kgf/litro);
- 3) nos bancos dianteiros, piloto e co-piloto, temos dois ocupantes e apenas um no banco traseiro.

Peso e Balanceamento – MOONEY M20J						
Descrição do Item	Braço (m)	Quantidade		Carregamento		
		Máx.	Real	Peso (kgf)	Momento	
				Unit.	Total	
Peso Vazio Básico – FIXO	1,118		775			866,14
Ocupantes Dianteiros (Piloto+1 Pax)	0,897	2	2	77	154	138,08
Ocupantes Intermediários (2 Pax)	0,000	0	0	0	0	0,00
Ocupantes Traseiros (2 Pax)	1,793	2	1	77	77	138,08
Combustível Utilizável (litros)	1,229	208	208	0,72	150	184,11
Bagageiro Frente (kgf)	0,000	45	0	1	0	0,00
Bagageiro Atrás (kgf)	2,426	45	30	1	30	72,77
Resumo do Carregamento	Valor	Observações				
Peso de Decolagem (kgf)	1.186	Peso Normal				
Local. Do Centro de Gravidade(in)	46,45	C.G Está Dentro				

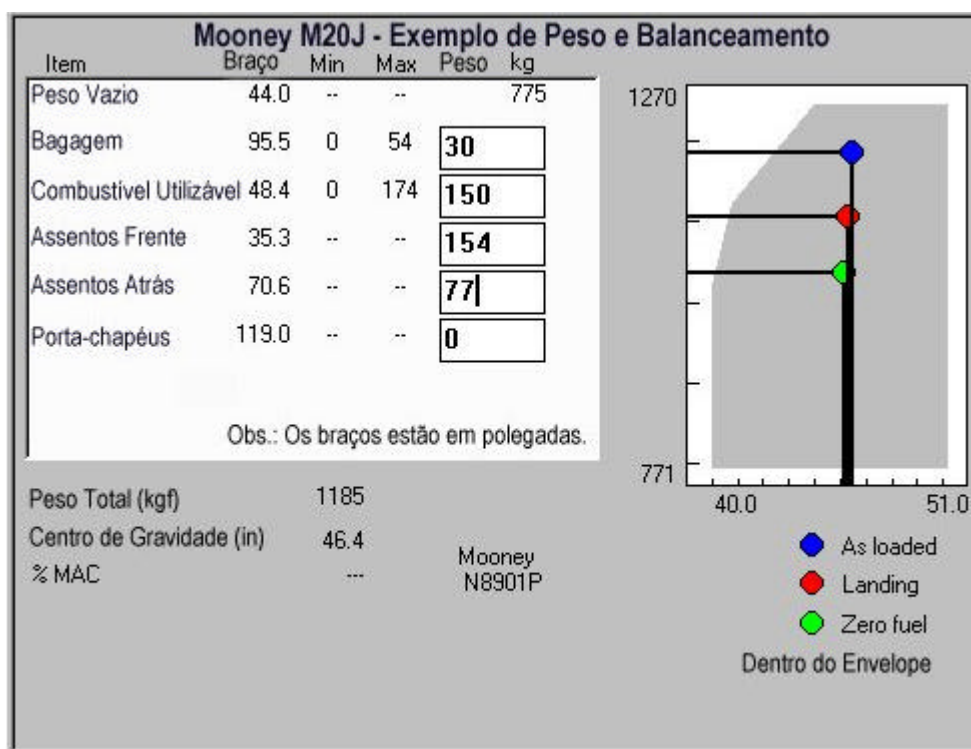
O peso total de 1.185 kgf (ponto azul) está abaixo do peso máximo de decolagem e o C.G. está localizado dentro do envelope a 46,4 polegadas. Entretanto, deve ser observado que o peso máximo para pouso está excedido, o que significa que a aeronave não pode pousar imediatamente, devendo aguardar o consumo de combustível.

O braço do C.G. é encontrado dividindo-se o momento total pelo peso total.

O envelope do C.G. é formado pelos seguintes pontos, ficando sua marcação como exercício para o leitor:

Ponto	Braço, em in (abscissa X)	Peso em lb (ordenada Y)
1	41,0	1,750
2	41,0	2,250
3	41,8	2,480
4	45,0	2,745
5	50,2	2,745
6	50,2	1,750
7	41,0	1,750

- Quadro de Valores para Marcação do Envelope do C.G



- Exemplo de Cálculo de Envelope de C.G.

5. Anexos

5.1 Anexo I – Peso e Localização

Nesta tabela podem ser entrados os dados de peso e braço do momento para efeito de cálculos dos momentos peso vezes braço.

Somam-se os pesos e os momentos. O braço do C.G. será dado pelo quociente do momento total pelo peso total.

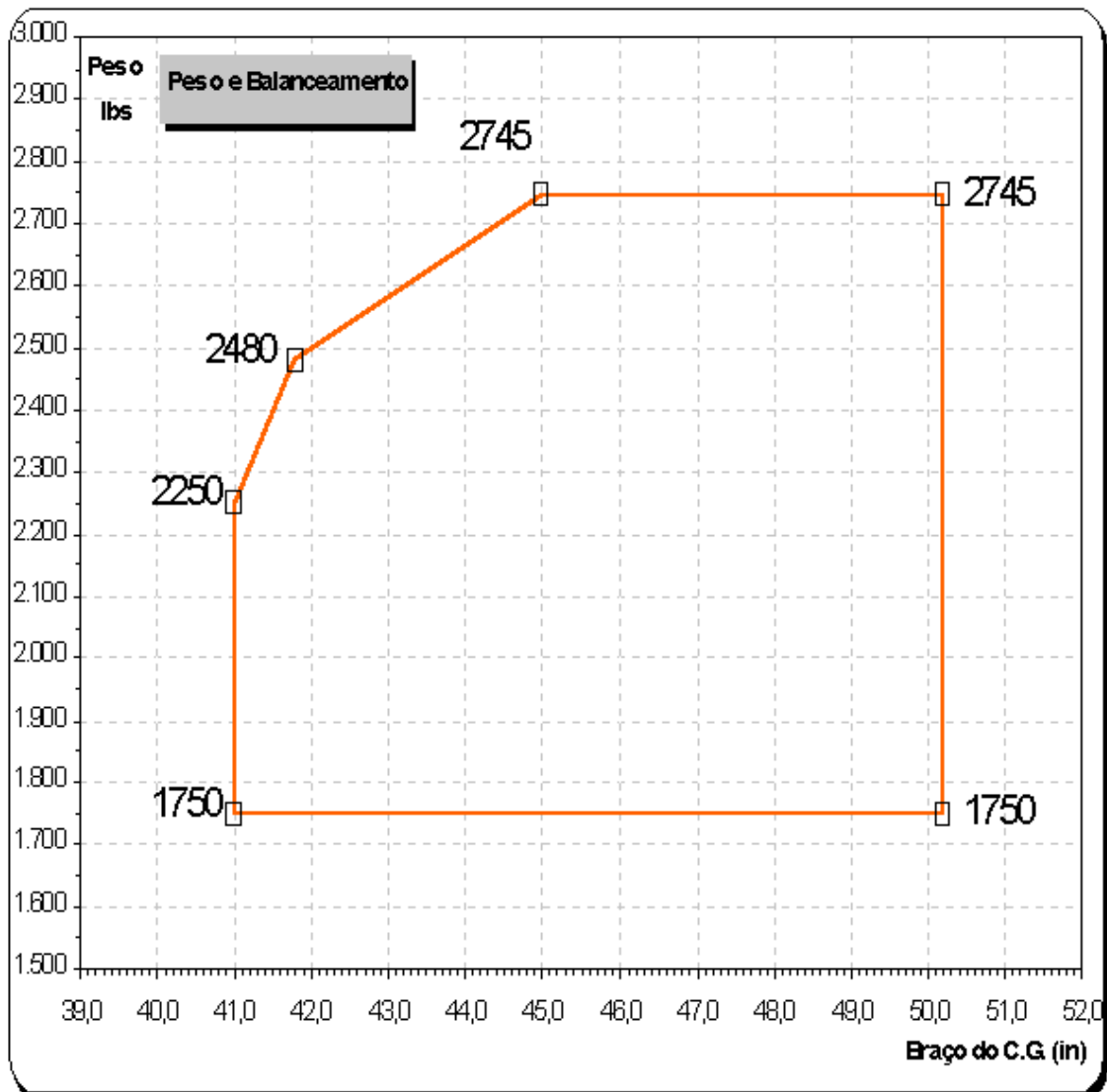
Os dados de peso e braço poderão ser plotados no gráfico do Anexo II.

Disposição dos Pontos de Carga em Aeronaves de Pequeno Porte	
Tipo da Aeronave: _____ Data: ____/____/____	
Peso Vazio: _____ kgf Braço: _____ m Momento: _____ kgf.m	
Combustível: Dens.: 0,72 kgf/Litro Braço: _____ m	
No Tanque: _____ Litros _____ kgf Momento: _____ kgf.m	
Bagageiro Dianteiro	
Cap.: _____ kgf	
Braço: _____ m	
Momento: _____ kgf.m	
Assento Piloto = 77kgf	Assento Co-piloto = 77kgf
Braço: _____ m	Braço: _____ m
Momento: _____ kgf.m	Momento: _____ kgf.m
Assento Pax - 1-E = 77kgf	Assento Pax - 1-D = 77kgf
Braço: _____ m	Braço: _____ m
Momento: _____ kgf.m	Momento: _____ kgf.m
Assento Pax - 2-E = 77kgf	Assento Pax - 2-D = 77kgf
Braço: _____ m	Braço: _____ m
Momento: _____ kgf.m	Momento: _____ kgf.m
Bagageiro Traseiro	
Cap.: _____ kgf	
Braço: _____ m	
Momento: _____ kgf.m	

5.2 Anexo II – Gráfico de Peso e Balanceamento

Inicialmente devem ser marcados os pontos dos vértices do polígono do envelope do C.G., específico para cada aeronave. Os dados e a escala do exemplo são referentes ao M20J.

Após os cálculos de peso total e momento total, lance no gráfico abaixo o ponto do C.G., verificando se está dentro do envelope.



6. Referências Bibliográficas

- BRANSON, Lane K. Mecânica: estática e dinâmica. Tradução por Roberto Andrade. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, p.135-63, 1974. 440p. Tradução de: Engineering Mechanics - Statics and Dynamics.
- DENKER, John S. See How it Flies, Disponível: <http://www.monmouth.com/~jsd/how/title.html> Consultado em 4 jun. 1999.
- DOCA, Ricardo Helou. BISCUOLA, Gualter José. VILLAS BÔAS, Newton. Tópicos de Física: mecânica. 10 ed. São Paulo: Saraiva, 1992. 3v, V.1, p.256-67.
- EMBRAER. Manual de Operação: EMB – 711 ST - CORISCO II. São Paulo, p.6.3, 14 fev. 1980.
- FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. Dicionário da Língua Portuguesa. 2 ed. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1996.
- MENTOR SOFTWARE A JEPPESEN COMPANY. Flitestar For Windows, versão 7.2, 1997. Consultado em 6 jun. 1999.
- NASA - Glenn Research Center - Determining Center of Gravity. Disponível: <http://www.lerc.nasa.gov/WWW/k-12/BGA/BGAindex.html> Consultado em 23 maio 1999.
- NASA - Glenn Research Center. FoilSim, versão 1.1a, 27 abr. 1999. Disponível: <http://www.lerc.nasa.gov/WWW/K-12/BGA/BGAindex.html> Consultado em 3 jun. 1999.
- SAMPAIO, José. Aeromodelismo - C.G. - Como Calcular. Skydive Air Sports, São Paulo, n.1, p.57, 1993.

7. Glossário

Braço de alavanca: A menor distância orientada de um ponto à reta suporte do vetor representativo duma força.

Cabrar: Elevar (o avião) o nariz em vôo. [Cf., nesta acepção: picar.]

Centrípeta: Diz-se de uma força ou de uma grandeza vectorial cujo suporte é o raio de curvatura da trajetória de um móvel e cujo sentido é o oposto ao deste raio.

Centro de gravidade: O ponto de aplicação do vector peso de um corpo sujeito à atração gravitacional da Terra; baricentro.

Centro de massa: Num corpo rígido, ou num sistema de corpos rígidos, ponto que se move como se toda a massa do sistema estivesse concentrada nele e toda a força externa atuante sobre o sistema nele estivesse aplicada; centro de inércia.

Envelope: Curva delimitando um espaço geométrico, cujos pontos podem ser determinados através de uma relação matemática ou empiricamente.

Estol: Redução da velocidade relativa ao ar, de um avião ou de um aeromodelo, a ponto de o fazer cair, por ser o seu peso maior que a força de sustentação das asas; perda.

Equilíbrio mecânico: Estado de um sistema no qual a resultante de todas as forças que atuam sobre ele é nula e o par resultante de todos os binários é, também, igual a zero.

Inércia: Resistência que todos os corpos materiais opõem à modificação do seu estado de movimento ou de repouso.

Massa: Grandeza fundamental da física que mede a inércia de um corpo, e que é igual à constante de proporcionalidade existente entre uma força que atua sobre o corpo e a aceleração que esta força lhe imprime, e cuja unidade de medida, no Sistema Internacional, é o quilograma. [Cf., nesta acepç., peso.]

Modelo: Fís. Conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico pelo qual se procuram explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades do sistema.

Momento: Produto vectorial do vector posição do ponto de aplicação de uma força pelo vector força; momento de força.

Peso: Força que age sobre um corpo nas vizinhanças de um planeta e resulta da atração universal; o produto da massa de um corpo pela aceleração da gravidade. [Cf. massa.]

Picar: Voar (o avião) baixando o nariz em direção a terra:

Programa de computador: Sequência de instruções ou declarações expressas em uma linguagem de programação, com o objetivo de obter um resultado específico.

Torque: Sistema de duas forças paralelas de suportes distintos, com sentidos opostos, e que atuam sobre um corpo; binário, par, torque.

8. Índice Remissivo

- aceleração da gravidade, 6
aeronaves, 1, 4, 18
alternativa, 4
ângulo de ataque, 15, 16
arrasto, 13
arredondamento, 15
atitude, 15
aviação, 4
bagageiro, 19, 20
balanceamento, 1, 4, 17
baricentro, 8
braço, 7, 11, 17, 18, 19, 20
braço (b) da força F , 7
braços do C.G., 18
C.G., 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 24
campo gravitacional, 6, 8
capacidade de carga, 11
carga transportada, 4
carregamento, 4, 10, 11, 12, 17, 19
centro de gravidade, 7, 8, 10, 11, 12, 15
centro de massa, 8
centro de sustentação, 14, 15
centro geométrico, 8
combustível, 4, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 20
Condições de Equilíbrio, 5, 10
Corda Média Aerodinâmica, 15
CORISCO II, 10, 12, 14, 24
corpo material, 6
corpo rígido, 7
Corpo rígido, 7
corpos, 6, 7, 8
de ação e reação, 6
decolagem, 10, 12, 14, 15, 17
deslocamento do C.G., 12
direção, 6, 15
e sentido, 6
eixo, 7, 13, 17, 18
EMBRAER, 10, 14, 17, 24
empresas virtuais, 4
envelope, 10, 11, 12, 17, 18, 19, 20
equilíbrio, 6, 7, 8, 9, 12, 13, 15, 16
estabilizador horizontal. Consulte profundor
Excel, 17, 18
excesso de peso, 20
Física, 4, 6, 12, 24
flare. Consulte arredondamento
Flight Simulator 98, 4
FliteStar, 4, 18, 19
força, 6, 7, 8, 9, 13, 15, 18, 20
força peso, 6, 13
forças, 6, 7, 11, 12, 13
Forças, 5, 12
FS2000, 19
FS98, 4, 19
horas de voo, 4
intensidade, 6, 7
leme vertical, 7
libra (lb), 6
libra-massa, 6
limite máximo, 10, 11, 18
longitudinal, 13, 16, 18
Manual de Operação, 17, 24
massa, 6, 7, 8, 9, 13
Mentor-Jeppesen, 4, 18, 19
modelo, 4, 17, 18, 19
Momento Escalar, 7
Momentos, 5, 11
Mooney M20J, 19

FORUM DE SIMULAÇÕES AÉREAS – FSA
PESO E BALANCEAMENTO DE AERONAVES DE PEQUENO PORTE

Nivelamento, 10, 11	profundor, 13, 14, 15
ocupante, 19	quilograma (kg), 6
óleo, 10	quilograma-força, 6
Partícula, 6	reabastecimento, 4
passageiros, 4, 10, 11, 12, 18	simulação, 4, 19
peso, 1, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 17, 18, 19, 20	sustentação, 13, 14, 15, 16
Peso e Balanceamento, 10, 12, 17, 20	torque, 13
peso máximo de decolagem, 12, 17, 18, 19, 20	Torque, 7
peso máximo de pouso, 12	tração, 13
peso vazio, 10, 17	transportes de cargas, 4
planilha de cálculos. Consulte Excel	treinamento, 4
ponto de aplicação, 7, 15	vôo, 4, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20
ponto material, 6	